

Low-velocity Impact on Sandwich Beams with Two-Dimensional Curved Re-Entrant Auxetic Cores

Zahra Tahmasebi-Tahneh, Mehdi Ranjbar-Roeintan * 

Department of Mechanical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran.

ABSTRACT: This research investigates the low-velocity impact on sandwich beams with two-dimensional curved reentrant auxetic cores. Using a 3D printer, tensile test specimens are fabricated, and their mechanical properties are extracted. In addition, using a 3D printer, sandwich beam specimens with two-dimensional curved reentrant auxetic cores are fabricated, consisting of curved unit cells at angles of 30, 45, and 60 degrees. Three-point bending and drop-weight impact tests are performed on the specimens. Polylactic acid is used as the material for the beams. The findings from the three-point bending test show that increasing the internal angle of the curved unit cell corresponds to decreasing the slope of the linear portion of the graph and the amplitude of the applied bending force. The impact response history includes factors such as contact force, absorbed energy, impactor velocity, impactor displacement, and displacement of sandwich beams with two-dimensional curved reentrant auxetic cores when subjected to a 3 J drop-weight impact test. Also, Poisson's ratio and relative density of two-dimensional curved reentrant auxetic unit cells with angles of 30, 45, and 60 degrees are obtained. One of the important findings of the impact test is that in order to maximize energy absorption, sandwich beams with two-dimensional curved reentrant auxetic cores with unit cells of 30 degrees angle perform best compared to other angles.

Review History:

Received: Sep. 06, 2025
Revised: Oct. 19, 2025
Accepted: Oct. 28, 2025
Available Online: Nov. 01, 2025

Keywords:

Auxetic Materials
Curved Unit Cell
Three-Point Bending Test
Drop-Weight Impact Test
Absorbed Energy

1- Introduction

The concept of metamaterial history was first proposed by Russian theorist Veselago in 1968 [1]. Metamaterial is derived from the Greek word meaning superior. It is a synthetic composite material produced by combining several elements [2]. According to the European Union, the term metamaterial is defined as "an arrangement of man-made structural components designed to achieve useful and unusual electromagnetic properties." Metamaterials are commonly used to enhance antenna system performance, electromagnetic properties, absorb electromagnetic radiation and modify the elastic properties of materials [3]. In materials, mechanical properties have been widely studied due to their high importance in real-life applications. Recently, various materials have been found in nature that exhibit attractive properties that cannot be achieved with conventional materials. Mechanical metamaterials include negative elastic modulus, negative Poisson's ratio, zero shear modulus, etc. [4]. Poisson's ratio represents the relationship between transverse strain and longitudinal strain. In simple terms, this constant indicates how much transverse strain occurs relative to longitudinal strain. Poisson's ratio for a linear elastic isotropic material has been reported to range

between -1 and 0.5. For anisotropic structures, Poisson's ratios can have any positive or negative value, provided that the strain energy density function remains positive and finite [5]. Auxetic materials are materials that have a negative Poisson's ratio, meaning that when stretched in the longitudinal direction, they expand in the transverse direction and vice versa. Using an experimental approach, impact tests on the Auxetic Kevlar laminated composites were performed [6]. The tube with a re-entrant auxetic structure manufactured by additive manufacturing under low-velocity impact was studied [7]. Using the cellular collapse mechanism, the auxetic honeycomb under low and high-velocity impact was studied [8]. Using Zig-Zag theory and Gibson's equations, a sandwich panel with a re-entrant auxetic core and carbon fiber reinforced face sheets under low-velocity impact was modeled [9]. A three-dimensional re-entrant four-pointed star sandwich plate was introduced, and low-velocity impact analysis was studied by experimental and numerical approaches [10].

This article examines the low-velocity impact of sandwich beams that incorporate a two-dimensional curved re-entrant auxetic core through experimental methods. Tensile tests, three-point bending tests, and drop-weight impact tests are

*Corresponding author's email: m.ranjbar-roeintan@kut.ac.ir

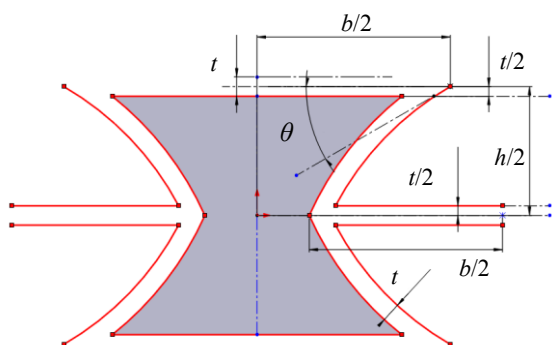


Fig. 1. Schematic of a unit cell of two-dimensional curved re-entrant auxetic core (marked with red color).

conducted on the sandwich beams with different angles of curved unit cells. Finally, Poisson's ratio and relative density of curved unit cells are extracted.

2- Methodology

Schematic of a unit cell of a two-dimensional curved re-entrant auxetic core that is designed in this research is illustrated in Figure 1. The volume of the unit cell's components divided by the volume of the rectangular cube that covers the unit cell is defined as the relative density of the unit cell.

The unit cell is defined by parameters t , h , b and θ , which indicate the thickness, height, length and angle, respectively. Three layers of unit cells are considered in the sandwich beam core. With all the parameters being constant, only by changing the angle of the unit cell, three types of sandwich beams with angles of 30, 45 and 60 degrees are fabricated using a 3D printer that are shown in Figure 2.

3- Results and Discussion

The sandwich beams are subjected to a three-point bending test, and the bending force curve is plotted in "Figure 3". The values of the slope of the linear part of the graph for angles of 30, 45 and 60 degrees are 51.5632, 25.8510 and 19.9569 N/mm, respectively. With an increase of 50 and 100 percent of the curved unit cell angle relative to the 30-degree the slope of the linear part of the graph decreases by 487.49 and 27.61 percent, respectively. In general, the range of applied bending force decreases with an increase in the angle.

Figure 4 shows the contact force history between the impactor tip and the upper surface of the sandwich beam after the 3-Joule drop-weight impact test. The maximum contact force for the curved unit cells with angles of 30, 45, and 60 degrees is 802.469, 679.012, and 493.827 N, respectively.

With an increase of 50 and 100 percent of the curved unit cell angle compared to the 30-degree angle, the maximum contact force is reduced by 15.38 and 38.46 percent, respectively.



a



b



c

Fig. 2. Sandwich beams with two-dimensional curved re-entrant auxetic core fabricated by a 3D printer, a) 30-degree, b) 45-degree and b) 60-degree.

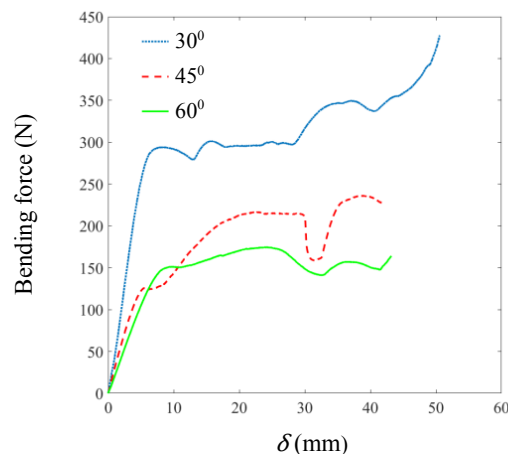


Fig. 3. Force-displacement diagram of sandwich beams with two-dimensional curved re-entrant auxetic after the three-point bending test.

4- Conclusions

An increase in the unit cell angle led to a reduction in its relative density, which in turn decreased the slope of the force-displacement curve and the range of bending forces during the bending test. Results from the impact test indicated that

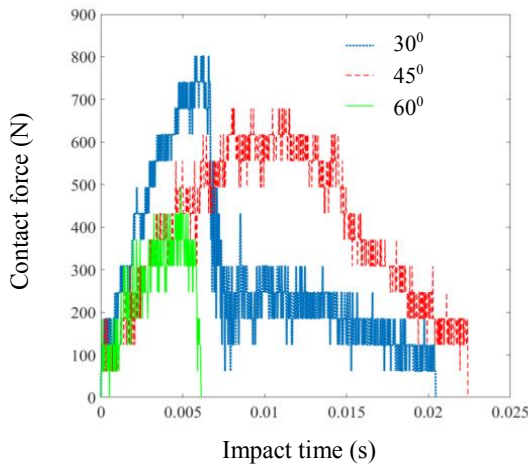


Fig. 4. Contact force diagram of sandwich beams with two-dimensional curved re-entrant auxetic after the drop-weight impact test.

the sandwich beam with a 30-degree unit cell experienced both indentation and surface cracks at the contact point, with its maximum contact force exceeding that of the 45-degree angle beam, which only showed indentation. The maximum contact force at 60-degree angles was noticeably lower than that at other angles due to the failure of the unit cell.

References

- [1] V.G. Veselago, The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ , *Phys.-Usp.*, 10(4) (1968) 509-514.
- [2] K. Parveen, Metamaterials: Types, applications, development, and future scope, *Int. J. Adv. Res. Innov. Ideas Educ. Tech.*, 4(3) (2018) 2325-2327.
- [3] M.I. Hussein, M.J. Leamy, M. Ruzzene, Dynamics of phononic materials and structures: Historical origins, recent progress, and future outlook, *Appl. Mech. Rev.*, 66(4) (2014) 040802.
- [4] J.U. Surjadi, L. Gao, H. Du, X. Li, X. Xiong, N.X. Fang, Y. Lu, Mechanical metamaterials and their engineering applications, *Adv. Eng. Mater.*, 21(3) (2019) 1800864.
- [5] T. Ting, T. Chen, Poisson's ratio for anisotropic elastic materials can have no bounds, *Q. J. Mech. Appl. Math.*, 58(1) (2005) 73-82.
- [6] S. Yang, V.B. Chalivendra, Y.K. Kim, Fracture and impact characterization of novel auxetic Kevlar®/Epoxy laminated composites, *Compos. Struct.*, 168 (2017) 120-129.
- [7] W. Lee, Y. Jeong, J. Yoo, H. Huh, S.-J. Park, S.H. Park, J. Yoon, Effect of auxetic structures on crash behavior of cylindrical tube, *Compos. Struct.*, 208 (2019) 836-846.
- [8] Q. Gao, W.-H. Liao, L. Wang, On the low-velocity impact responses of auxetic double arrowed honeycomb, *Aerosp. Sci. Technol.*, 98 (2020) 105698.
- [9] H. Peyghani, M. Ranjbar-Roeintan, Low-velocity impact on a CFRP sandwich plate with a reentrant auxetic core, *Mech. Adv. Mater. Struc.*, (2024) 1-16. doi:10.1080/15376494.2024.2420258
- [10] Y.C. Qu, X.C. Teng, Y. Zhang, W.Z. Jiang, M.L. Xue, T. Xue, J.W. Shi, X. Ren, A novel 3D composite auxetic sandwich panel for energy absorption improvement, *Eng. Struct.*, 322 (2025) 119129.



ضربه سرعت پایین بر تیرهای ساندویچی با هسته‌های آگزتیک ری-اینترنت خمیده دوبعدی

زهرا طهماسبی طه‌نه، مهدی رنجبر روئین تن^{*}

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۷
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰

کلمات کلیدی:

مواد آگزتیک
سلول واحد خمیده
تست خمش سه نقطه
تست ضربه سقوط وزنه
انرژی جذب شده

خلاصه: این تحقیق به بررسی ضربه سرعت پایین بر روی تیرهای ساندویچی با هسته‌های آگزتیک ری-اینترنت خمیده دوبعدی می‌پردازد. با استفاده از چاپگر سه بعدی، نمونه‌های آزمایش کشش ساخته شده و خواص مکانیکی آنها استخراج می‌شود. علاوه بر این، با استفاده از چاپگر سه بعدی، نمونه‌های تیرهای ساندویچی با هسته‌های آگزتیک ری-اینترنت خمیده دوبعدی شامل سلول‌های واحد خمیده با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه ساخته می‌شوند. آزمایش‌های خمش سه نقطه‌ای و ضربه سقوط وزنه بر روی نمونه‌های ذکر شده انجام می‌شود. از پلی‌لاکتیک اسید به عنوان ماده اولیه برای ساخت تیرها استفاده می‌شود. یافته‌های حاصل از آزمایش خمش سه نقطه‌ای نشان می‌دهد که افزایش زاویه داخلی سلول واحد خمیده با کاهش شیب بخش خطی نمودار و دامنه نیروی خمشی اعمال شده متناسب است. تاریخچه پاسخ ضربه شامل عواملی مانند نیروی تماسی، انرژی جذب شده، سرعت ضربه زننده، جابجایی ضربه زننده و جابجایی تیرهای ساندویچی با هسته‌های آگزتیک ری-اینترنت خمیده دوبعدی، هنگام قرار گرفتن در معرض آزمایش ضربه سقوط وزنه ۳ ژول است. همچنین ضریب پواسون و چگالی نسبی سلول‌های واحد آگزتیک ری-اینترنت خمیده دوبعدی با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه بدست می‌آید. یکی از یافته‌های مهم آزمایش ضربه این است که با هدف به حداکثر رساندن جذب انرژی، تیرهای ساندویچی با هسته‌های آگزتیک ری-اینترنت خمیده دوبعدی، با سلول‌های واحد زاویه ۳۰ درجه بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر زوایا را دارند.

۱- مقدمه

مفهوم تاریخچه فراماده^۱ برای اولین بار توسط نظریه پرداز روسی، وِسلایگو، در سال ۱۹۶۸ پیشنهاد شد و توضیح داد که موادی با نفوذپذیری و همچنین گذردهی الکتریکی منفی، از نظر تئوری امکان پذیر بودند [۱]. فراماده از زبان یونانی گرفته شد که معنای آن برتر بود. این یک ماده کامپوزیت مصنوعی است که با ترکیب تعدادی از عناصر، از جمله پلاستیک و فلزات تولید می‌شود [۲]. طبق تعریف اتحادیه اروپا، اصطلاح فراماده به صورت «آرایی از اجزای ساختاری ساخته دست بشر که برای دستیابی به ویژگی‌های الکترومغناطیسی مفید و غیرمعمول طراحی شده‌اند» تعریف می‌شود. فراماده عموماً برای افزایش عملکرد سیستم آنتن، ویژگی‌های الکترومغناطیسی، جذب تابش الکترومغناطیسی و اصلاح خواص الاستیک مواد استفاده می‌شود [۳]. علاوه بر این، سایر کاربردهای فراماده در بخش‌های مختلف شامل امنیت عمومی، ارتباطات میدان نبرد با فرکانس

بالا، کاربردهای هوافضا از راه دور، شناسایی حسگرها و افرادی که در زمینه نظامی به عنوان محقق کار می‌کنند نیز از فراماده برای تشخیص وجود مواد منفجره و آلودگی و غیره استفاده می‌کنند [۴]. در مواد، خواص مکانیکی به دلیل اهمیت بالا در استفاده در زندگی واقعی، به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. اخیراً، مواد مختلفی در طبیعت یافت می‌شوند که ویژگی‌های جذابی را نشان می‌دهند که با مواد معمولی قابل دستیابی نیستند. فراماده مکانیکی شامل مدول الاستیک منفی، نسبت پواسون منفی، مدول برشی صفر و غیره هستند [۵]. ضریب پواسون نشان دهنده رابطه بین کرنش عرضی و کرنش طولی است. به عبارت ساده‌تر، این ثابت نشان می‌دهد که چه مقدار کرنش عرضی نسبت به کرنش طولی رخ می‌دهد. ضریب پواسون برای یک ماده ایزوتروپیک الاستیک خطی در محدوده‌ای بین -۱ و ۰٫۵ گزارش شده است [۶]. برای ساختارهای ناهمسانگرد، نسبت‌های پواسون می‌توانند هر مقدار مثبت یا منفی داشته باشند، مشروط بر اینکه تابع چگالی انرژی کرنش مثبت و محدود باقی بماند [۷]. مواد آگزتیک موادی هستند که ضریب پواسون منفی دارند، به این معنی که وقتی در جهت طولی

1. Metamaterial

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.ranjbar-roeintan@kut.ac.ir



کشیده می‌شوند، در جهت عرضی منبسط می‌شوند و عکس این حالت نیز اتفاق می‌افتد. مواد آگرتیک کاربردهای زیادی به عنوان جاذب انرژی ضربه، غربال‌های مولکولی و حسگرها و همچنین در صنایع ورزشی و پزشکی دارند [۸]. به دلیل پیچیدگی‌های ساختار داخلی مواد آگرتیک، این مواد با استفاده از چاپگرهای سه‌بعدی تولید می‌شوند.

کاظمی و اقبال‌پور [۹] مروری کلی در مورد انواع و کاربرد سلول‌های واحد آگرتیک انجام دادند. در سال ۱۹۸۷، یک نوع فوم با ثابت پواسون منفی توسعه یافت [۱۰]. در سال ۱۹۹۱، ایوانز^۱ کلمه آگرتیک را از یک عبارت یونانی پیشنهاد کرد [۱۱]. تحقیقات بسیاری تا به امروز در مورد عملکرد سلول‌های واحد آگرتیک در برابر بارگذاری‌های مختلف انجام شده است. آلن^۲ و همکاران [۱۲] بارگذاری ضربه سرعت‌پایین و شبه استاتیک را بر روی فوم‌های پلی‌اورتان سلول باز معمولی و آگرتیک که در آن ساختارهای آگرتیک به روش ترمومکانیکی تولید شدند، انجام دادند. دونکان^۳ و همکاران [۱۳] خواص مواد با نرخ کرنش پایین و تضعیف نیروی ضربه فوم آگرتیک و نمونه مشابه پلی‌اورتان سلول باز مرسوم را مقایسه کردند. در این مطالعه، مکعب‌هایی از فوم آگرتیک با استفاده از یک فرآیند تبدیل ترمومکانیکی ساخته شدند و آزمایش‌های ضربه سقوط وزنه ۶ ژول، روی فوم‌های پوشیده شده با ورق پلی‌پروپیلن انجام شدند. با استفاده از برنامه ال‌اس‌دیانا، ژیانگ و هو^۴ [۱۴] مدل سه‌بعدی کامپوزیت آگرتیک متعامد چند لایه را تحت ضربه سرعت‌پایین شبیه‌سازی کردند. یانگ و همکاران [۱۵] مطالعه‌ای تجربی برای بررسی خواص شکست و ضربه کامپوزیت‌های چندلایه کولار آگرتیک جدید انجام دادند، که در آن برای مقایسه، کامپوزیت‌های بافته شده استاندارد کولار با و بدون عملیات پلی‌اورتان نیز در نظر گرفته شدند. برای آن سه کامپوزیت، الیاف نابلون کوتاه با دو طول الیاف مختلف و سه چگالی الیاف متنوع بین چندلایه‌ها قرار داده شدند. در این تحقیق، فرآیند تزریق خلاء به همراه فشرده‌سازی بهینه برای ساخت کامپوزیت‌ها به کار گرفته شد. تجزیه و تحلیل ضربه سرعت‌پایین بر پل‌های ساندویچی با شبکه غیر آگرتیک و فرم‌های آگرتیک لانه زنبوری ری-اینترنت و ورق‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت [۱۶]. لی و همکاران^۵ [۱۷] به بررسی اثرات ساختار آگرتیک بر عملکرد تصادف از نظر نیروی تصادف محوری و جذب انرژی ویژه پرداختند که با ساختارهای

معمولی و لانه زنبوری ارزیابی شدند. بر اساس روش طراحی سیستماتیک، واحدهای بازگشتی برای ساختار آگرتیک به طور منظم در دیواره لوله چیده شدند که توسط تولید افزایشی با پودر فلز تولید شدند. با استفاده از مکانیسم فروپاشی سلولی، لانه زنبوری آگرتیک تحت ضربه‌های سرعت‌پایین و بالا مورد مطالعه قرار گرفت [۱۸]. لی^۶ و همکاران [۱۹] یک مدل‌سازی چندمقیاسی و تحلیل ضربه کم‌سرعت غیرخطی صفحات ساندویچی با رویه‌های کامپوزیت تقویت‌شده با گرافن و هسته‌های شبکه سه‌بعدی آگرتیک مدرج تابعی را ارائه دادند. خواص مواد وابسته به دما در رویه‌ها از طریق یک مدل میکرومکانیکی از نوع هالپین-تسای^۷ توسعه‌یافته تعیین شدند. هسته‌های شبکه سه‌بعدی طوری طراحی شدند که نسبت پواسون مؤثر منفی داشته باشند و دارای دو پیکربندی هدفمند در جهت ضخامت صفحه باشند. پل ساندویچی با صفحات رویه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه و هسته الیاف شیشه-پلی‌امید ساخته شدند و تحت بار ضربه‌ای سرعت پایین قرار گرفتند [۲۰]. هسته از یک سلول واحد آگرتیک سه‌بعدی ری-اینترنت که دارای چهار جزء چتری شکل و در یک چیدمان خاص سازماندهی شده بود، توسعه داده شد. کاظمی [۲۱]، مقاومت خمشی تیرهای ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته فوم پلی‌یورتان مدرج با چگالی‌های مختلف از طریق تست‌های آزمایشگاهی بررسی کرد. در این تحقیق، تأثیر لایه‌بندی، تغییرات مدرج چگالی هسته فوم و توالی لایه‌های فوم با چگالی‌های مختلف بر جذب انرژی تیرهای ساندویچی تحت خمش سه‌نقطه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از رویکردهای تجربی، عددی و نظری، وانگ^۸ و همکاران [۲۲]، پاسخ دینامیکی لانه زنبوری (پیکربندی شبیه آسیاب بادی متشکل از ستاره‌ها و شش‌ضلعی‌ها) را به طور سیستماتیک با محاسبات نظری، شبیه‌سازی‌های عددی و روش‌های تجربی مورد مطالعه قرار دادند. تنش‌های استاتیک و دینامیکی لانه زنبوری‌های محاسبه شد و سرعت‌های بحرانی منجر به حالت‌های تغییر شکل مختلف لانه زنبوری استخراج شد. در نهایت، طراحی گرادین لانه زنبوری‌های انجام شد و پاسخ دینامیکی آن از طریق شبیه‌سازی‌های عددی بررسی شد. با استفاده از تئوری زیگ-زاگ و معادلات گیبسون، یک پل ساندویچی با هسته آگرتیک ری-اینترنت و صفحات رویه تقویت‌شده با الیاف کربن تحت بارگذاری ضربه سرعت‌پایین از طریق معادلات تئوری توسط پیغانی و رنجبر روئین‌تن [۲۳] مدل‌سازی شد. یک صفحه ساندویچی ستاره‌ای چهارپر ری-اینترنت سه بعدی معرفی

1. Evans
2. Allen
3. Duncan
4. Jiang and Hu
5. Lee

6. Li
7. Halpin-Tsai
8. Wang

۲- مواد و روش‌ها

در این مقاله، از پلی‌لاکتیک اسید به عنوان ماده اولیه برای ساخت تیرها استفاده شده و روش آزمون استاندارد D638 برای خواص کششی پلاستیک‌ها به کار گرفته شده است. برای این منظور، سه نمونه از تیرهای دمبلی شکل با استفاده از چاپگر سه‌بعدی ساخته شده‌اند (شکل ۱).

شماتیک یک سلول واحد از هسته آگزتیک دوبعدی خمیده ری-اینترنت که در این تحقیق طراحی شده، در شکل ۲ نشان داده شده است. شایان ذکر است که مساحت اجزای سلول واحد تقسیم بر مساحت مستطیلی که سلول واحد را پوشانده است، به عنوان چگالی نسبی سلول واحد تعریف می‌شود که در نهایت این نسبت در چگالی پلی‌لاکتیک اسید ضرب می‌گردد.

در چاپگر سه بعدی قطر نازل ۰/۴ میلی‌متر، دمای چاپ ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت چاپ ۶۰ میلی‌متر بر ثانیه جهت لایه‌نگاری مثبت و منفی ۴۵ درجه و الگوی لایه‌نگاری به صورت شبکه در نظر گرفته شد. سلول واحد با پارامترهای h ، t و θ تعریف می‌شود که به ترتیب نشان‌دهنده ضخامت، ارتفاع، طول و زاویه خط مماس بر قسمت خمیده سلول واحد هستند. در این تحقیق سلول واحد با ضخامت برابر ۱/۲ میلی‌متر، ارتفاع ۱۶ میلی‌متر و طول ۲۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. سه لایه سلول واحد در هسته تیر ساندویچی در نظر گرفته شده است. در نهایت، تیر ساندویچی با طول کلی ۱۵۰ میلی‌متر، ارتفاع ۵۲/۱۹ میلی‌متر و عرض ۱۵ میلی‌متر طراحی می‌گردد. با ثابت بودن همه پارامترها، تنها با تغییر زاویه سلول واحد، سه نوع تیر ساندویچی با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه با استفاده از چاپگر سه‌بعدی ساخته می‌شوند. در نهایت، نمونه‌های طراحی و ساخته شده برای هر سه زاویه در شکل ۳ نشان داده شده است. آزمایش کشش ساده، خمش سه‌نقطه‌ای و

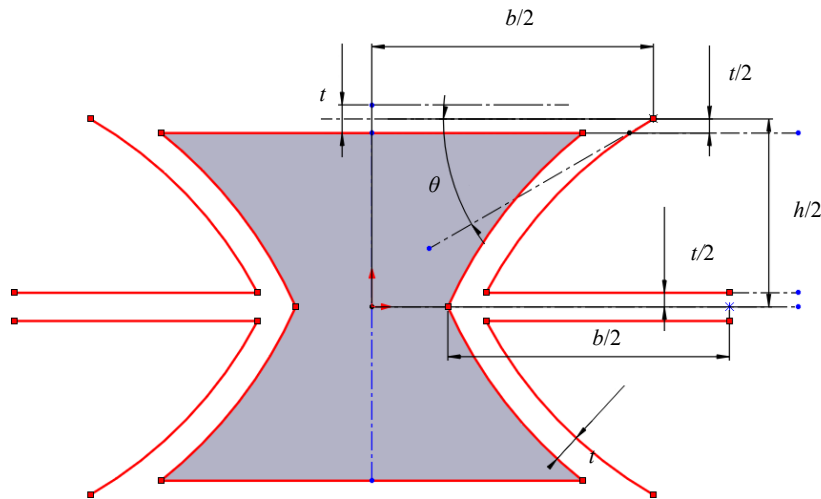
شد و تحلیل ضربه سرعت‌پایین بر این ساختار با رویکردهای تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفت [۲۴]. با استفاده از روش‌های تحلیلی و آزمایش‌های تجربی، کاظمی و میرزاییگی [۲۵] از طریق فرآیند خمش سه نقطه‌ای، تأثیر تغییرات چگالی و ضخامت هسته فومی بر تیرهای ساندویچی را بررسی کردند. ساخت نمونه‌های آگزتیک شش‌ضلعی به روش عددی و تجربی توسط طاهرخانی و همکاران [۲۶] انجام شد و اثر هندسه ساختار بر ضریب پواسون این مواد مورد بررسی قرار گرفت. طراحی یک ساختار مشبک آگزتیک جدید بر پایه مکانیزم صلب چرخنده و انجام آزمایش کشش ساختارها توسط جعفری ندوشن و عبقری [۲۷] انجام گرفت.

یک سلول واحد آگزتیک خمیده دو بعدی ری-اینترنت به صورت نوآورانه در این مقاله شبیه‌سازی شده و چگالی نسبی و ضریب‌پواسون آن محاسبه می‌گردد. در این مقاله از طریق روش تجربی، آزمایش‌های کشش، خمش سه نقطه‌ای و ضربه سقوط آزاد بر روی تیرهای ساندویچی با زوایای مختلف سلول‌های واحد خمیده بررسی می‌شود. هسته آگزتیک با زوایای داخلی مختلف و تولید سلول‌های واحد خمیده متنوع ارزیابی می‌شود. تیرهای ساندویچی با استفاده از چاپگر سه‌بعدی و ماده پلی‌لاکتیک اسید تولید می‌شوند. پارامترهای کلیدی، شامل خواص مکانیکی ماده که از یک آزمایش کشش ساده تعیین شده است، منحنی نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای و تاریخچه‌های ثبت شده نیروی تماسی، انرژی جذب شده، سرعت ضربه‌زننده، جابجایی ضربه‌زننده و جابجایی تیر از آزمایش ضربه سقوط آزاد ۳ ژول جمع‌آوری و بررسی می‌شوند. در نهایت ضریب پواسون و چگالی نسبی سلول‌های واحد خمیده استخراج می‌گردد.



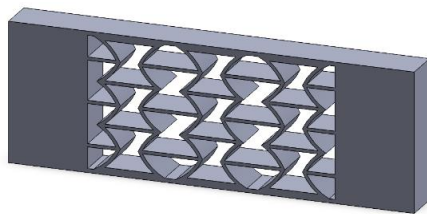
شکل ۱. سه نمونه از تیرهای دمبلی شکل بر اساس استاندارد D638 و ساخته شده توسط چاپگر سه‌بعدی.

Fig. 1. Three examples of dumbbell beam shapes based on the D638 standard made by a 3D printer.



شکل ۲. شماتیک یک سلول واحد از هسته آگزتیک خمیده دوبعدی ری-اینترنت (با رنگ قرمز مشخص شده است).

Fig. 2. Schematic of a unit cell of two-dimensional curved re-entrant auxetic core (marked with red color).

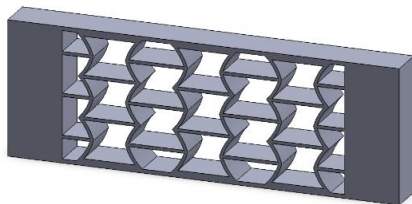


SolidWorks program



3D printer

الف

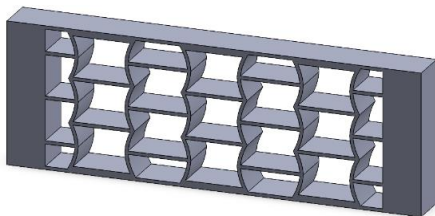


SolidWorks program

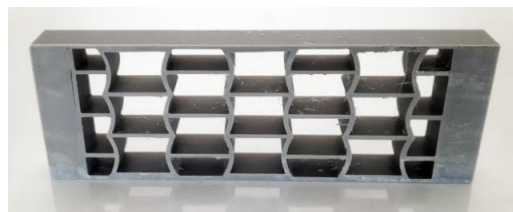


3D printer

ب



SolidWorks program

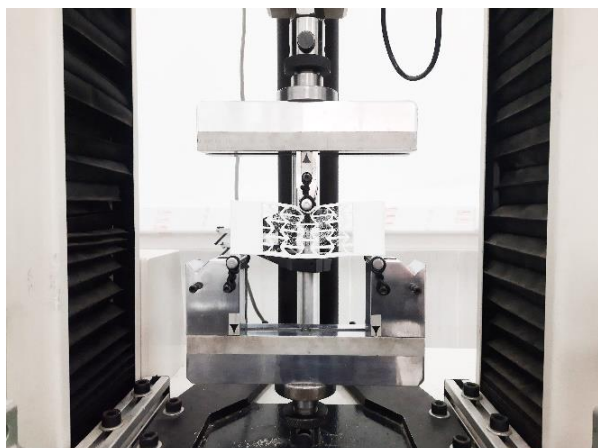


3D printer

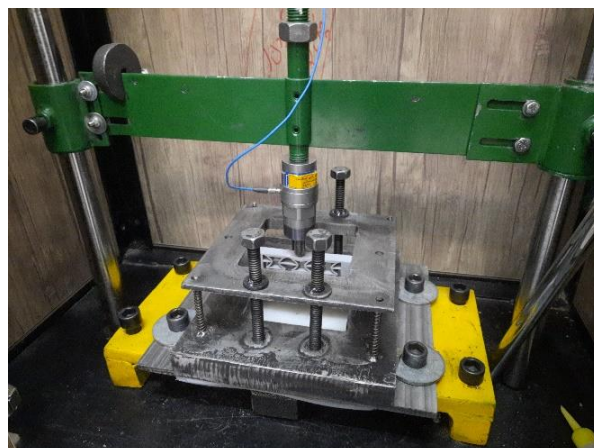
ج

شکل ۳. مدل تیرهای ساندویچی با هسته آگزتیک خمیده دوبعدی ری-اینترنت که توسط برنامه سالیدورکس طراحی و توسط چاپگر سه بعدی ساخته شده اند، الف) زاویه ۳۰ درجه، ب) زاویه ۴۵ درجه و ب) زاویه ۶۰ درجه.

Fig. 3. Models of sandwich beams with two-dimensional curved re-entrant auxetic core designed by the SolidWorks program and made by a 3D printer, a) 30-degree angle, b) 45-degree angle and c) 60-degree angle.



الف



ب

شکل ۴. دستگاه‌های مورد استفاده برای الف) آزمون کشش ساده و آزمون خمش سه‌نقطه‌ای و ب) آزمون ضربه سقوط وزنه.

Fig. 4. Devices used for a) simple tensile test and three-point bending test and b) drop-weight impact test.

$$\delta_i(t) = \delta_{i0} + v_{i0}t + \frac{gt^2}{2} - \int_0^t \left(\int_0^t \frac{F_c(t)}{m} dt \right) dt \quad (2)$$

$$e(t) = \frac{m(v_{i0}^2 - v_i(t)^2)}{2} + mg\delta_i(t) \quad (3)$$

$$K_c = \frac{4}{3} \sqrt{R_s} \left(\frac{1}{E} + \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} \right)^{-1} \quad (4)$$

$$F_c(t) = K_c (\delta_i(t) - \delta_b(t))^{1.5} \quad (5)$$

که در آن جرم ضربه‌زننده، سرعت اولیه ضربه‌زننده و شتاب گرانش به ترتیب m ، v_{i0} و g هستند. همچنین، در در زمان اولیه t برابر صفر، پارامترهای δ_{i0} (جابجایی اولیه ضربه‌زننده) برابر با صفر و v_{i0} برابر با $\sqrt{2e/m}$ است. همچنین، E_s ، ν_s و R_s مدول یانگ، نسبت پواسون و شعاع نوک ضربه‌زننده هستند. پارامتر E مدول یانگ تیر ساندویچی است که از آزمایش کشش به دست آمده و K_c سفتی تماسی است. بنابراین، از معادلات

ضربه سقوط آزاد با استفاده از دستگاه‌های نشان داده شده در شکل ۴ انجام می‌شود. در تست خمش شرایط مرزی به صورت تکیه‌گاه‌های ساده است که در دو طرف تیر دقیقاً در فاصله میانی قسمت‌های توپر قرار داده شد (شکل ۴الف). در تست ضربه از هر طرف تیر ۱۷/۵ میلی‌متر در تکیه‌گاه‌های گیردار قرار داده شد (شکل ۴ب).

هندسه ضربه‌زننده طوری است که نوک آن به صورت نیم‌کروی به شعاع ۶/۴ میلی‌متر و جرم کل سیستم متصل به ضربه‌زننده ۲/۸۸ کیلوگرم است. به راحتی می‌توان با تنظیم فاصله نوک ضربه‌زننده با سطح تیر، انرژی ضربه را تنظیم نمود. در دستگاه تست سقوط وزنه، از یک سنسور نیروی پیزوالکتریک با حداکثر ظرفیت ۴۰ کیلو نیوتن استفاده شده که توسط یک تقویت کننده شارژ آمپلی‌فایر، ولتاژ خروجی دستگاه تقویت گردیده و با استفاده از یک دستگاه کارت اسیلوسکوپ داده‌های خروجی بر روی نمایشگر رسم شده‌اند. با محاسبه تاریخچه نیروی تماسی $F_c(t)$ و زمان تماس t از آزمایش ضربه سقوط آزاد، پارامترهای تاریخچه سرعت ضربه‌زننده $v_i(t)$ ، تاریخچه جابجایی ضربه‌زننده $\delta_i(t)$ و تاریخچه انرژی جذب شده $e(t)$ را می‌توان به صورت زیر استخراج کرد [۲۸]:

$$v_i(t) = v_{i0} + gt - \int_0^t \frac{F_c(t)}{m} dt \quad (1)$$

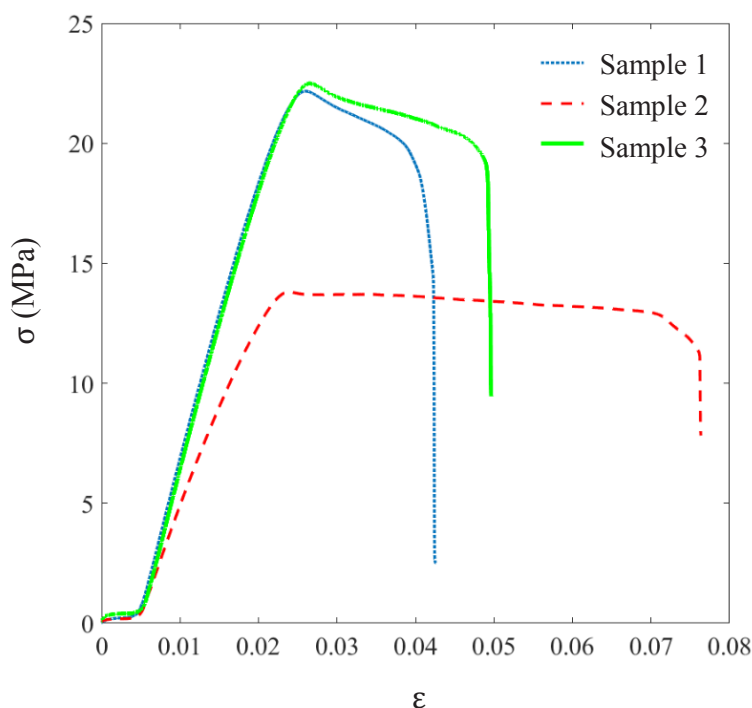
برای هر تست سه نمونه یکسان از هر کدام از تیرهای ساندویچی با هسته آگرتیک دوبعدی خمیده ری-اینترت شامل زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه ساخته شدند (شکل ۶). در هر تست یکسان، از بین نمونه‌هایی که پاسخ نزدیک به هم داشتند، یک نمونه به عنوان پاسخ آزمون انتخاب شد. در مرحله اول، تیرها در معرض تست خمش سه نقطه قرار گرفته و منحنی نیروی خمشی بر حسب جابجایی نقطه‌ای از تیر که در تماس با اهرم اعمال کننده نیروی خمشی بوده، در شکل ۷ رسم شده است.

مقادیر شیب بخش خطی نمودار (نیرو در برابر جابجایی در آزمایش خمش سه نقطه‌ای) برای زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب برابر با ۵۱/۵۶۳۲، ۲۵/۸۵۱۰ و ۱۹/۹۵۶۹ نیوتن بر میلی‌متر است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه داخلی سلول واحد خمیده، شیب بخش خطی نمودار کاهش می‌یابد. بنابراین با افزایش ۵۰ و ۱۰۰ درصدی زاویه سلول واحد خمیده نسبت به زاویه ۳۰ درجه، شیب بخش خطی نمودار به ترتیب ۴۹/۴۸۷ و ۶۱/۲۷ درصد کاهش می‌یابد. به طور کلی، محدوده نیروی خمشی اعمال شده با افزایش زاویه سلول واحد خمیده کاهش می‌یابد. نمودارها نوسان می‌کنند، زیرا

(۴) و (۵) (قانون تماس غیرخطی هرتز)، می‌توان تاریخچه جابجایی تیر در محل برخورد، یعنی $\delta_b(t)$ را محاسبه کرد.

۳- نتایج و بحث‌ها

در این بخش، منحنی تنش-کرنش و نمونه‌های پلی‌لاکتیک اسید پس از آزمایش کشش ساده در شکل ۵ نشان داده شده است. ویژگی‌های مکانیکی مانند مدول یانگ، استحکام کششی و کرنش شکست نمونه‌های پلی‌لاکتیک اسید در جدول ۱ به تفصیل آمده است. به منظور صحت سنجی پاسخ تست کشش، سه نمونه یکسان تیر دمبلی شکل تحت آزمون قرار گرفتند. با بررسی شکل ۵ و جدول ۱، مشاهده می‌شود که پاسخ نمونه ۲ نسبت به نمونه‌های ۱ و ۳ انحراف دارد، به عبارتی نمونه‌های ۱ و ۳ پاسخی شبیه به هم دارند و به عبارتی این انحراف ممکن است ناشی از خطای ساخت نمونه ۲ یا خطا در هنگام قرار دادن در فک‌های دستگاه تست کشش باشد. به همین به منظور استخراج خواص مکانیکی، میانگین‌گیری از داده‌های نمونه‌های ۱ و ۳ انجام شد و نمونه ۲ کنار گذاشته شد.



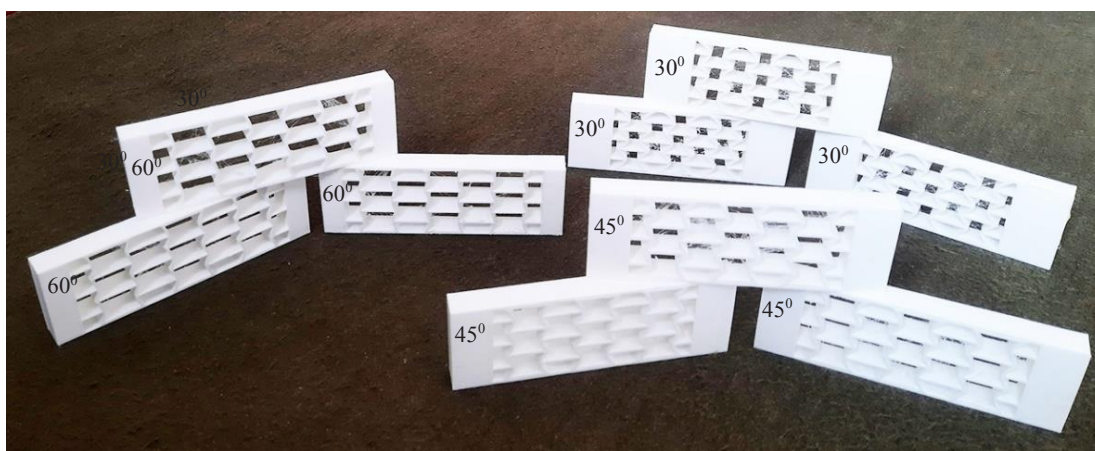
شکل ۵. الف) منحنی تنش-کرنش و ب) نمونه‌های پلی‌لاکتیک اسید پس از آزمایش کشش ساده.

Fig. 5. a) Stress-strain curve and b) polylactic acid samples after simple tensile test.

جدول ۱. خواص مکانیکی نمونه‌های پلی‌لاکتیک اسید پس از آزمایش کشش ساده.

Table 1. Mechanical properties of polylactic acid samples after simple tensile test.

شماره نمونه	مدول یانگ (مگاپاسکال)	استحکام کششی (مگاپاسکال)	کرنش شکست
۱	۱۱۷۳/۷	۲۲/۱۷	۰/۰۴۲۵
۲	۷۶۵/۹۱۹۵	۱۳/۸۰	۰/۰۷۶۳
۳	۱۰۷۷/۸	۲۲/۴۹	۰/۰۴۹۶
میانگین (۱ و ۳)	۱۱۲۵/۷۵	۲۲/۳۳	۰/۰۴۶۱



شکل ۶. سه نمونه یکسان از هر کدام از تیرهای ساندویچی با هسته آگزتیک دوبعدی خمیده ری-اینترنت شامل زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه.

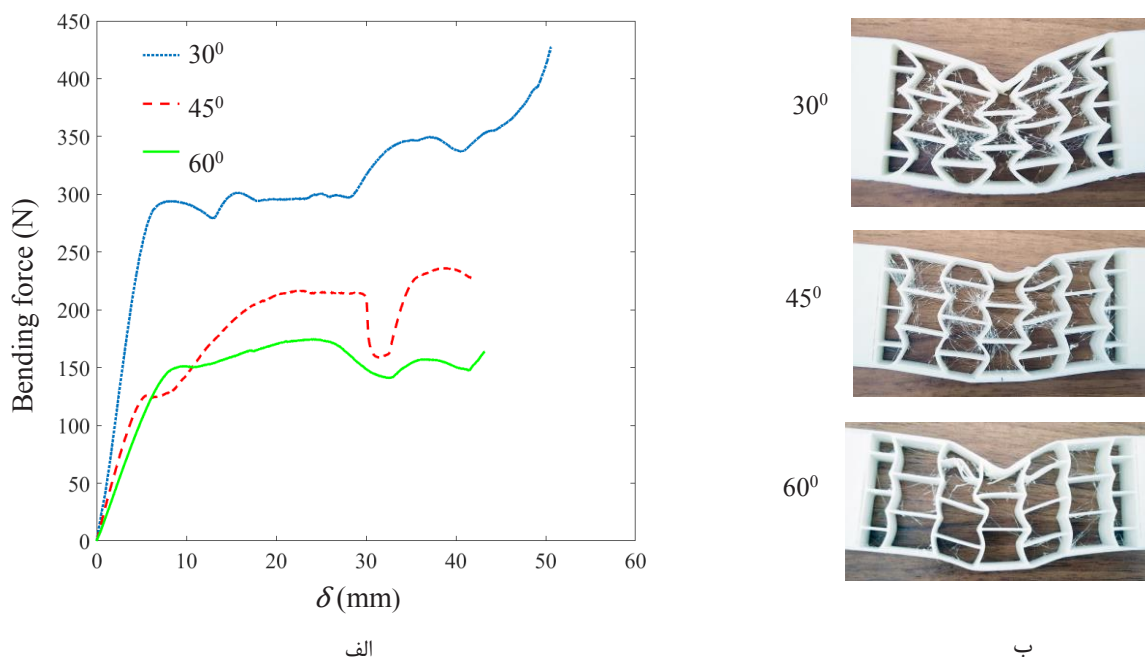
Fig. 6. Three identical samples of each of the sandwich beams with two-dimensional curved re-entrant auxetic core including angles of 30, 45 and 60 degrees.

خمیده تغییر نمی‌کند. برای تیرهای ساندویچی با هسته آگزتیک دوبعدی خمیده ری-اینترنت با زاویه ۳۰ درجه، روی سطح بالایی پل ساندویچی، ترک‌های سطحی در نقطه برخورد قابل مشاهده هستند که باعث می‌شود نمودار نیروی تماس در زمانی حدود ۰/۰۰۶ ثانیه به شدت افت کند. برای زاویه ۴۵ درجه، سلول واحد خمیده واقع در نقطه برخورد، دچار لهیدگی شده است، در حالی که در زاویه ۶۰ درجه، سلول واحد خمیده واقع در نقطه برخورد کاملاً شکسته است. تاریخچه پاسخ ضربه شامل انرژی جذب‌شده، سرعت ضربه‌زننده، جابجایی ضربه‌زننده و جابجایی تیرهای ساندویچی با هسته آگزتیک دوبعدی خمیده ری-اینترنت تحت آزمایش ضربه سقوط وزنه در شکل ۹ نشان داده شده است.

اثرات تغییر زاویه سلول واحد خمیده شامل ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه در این

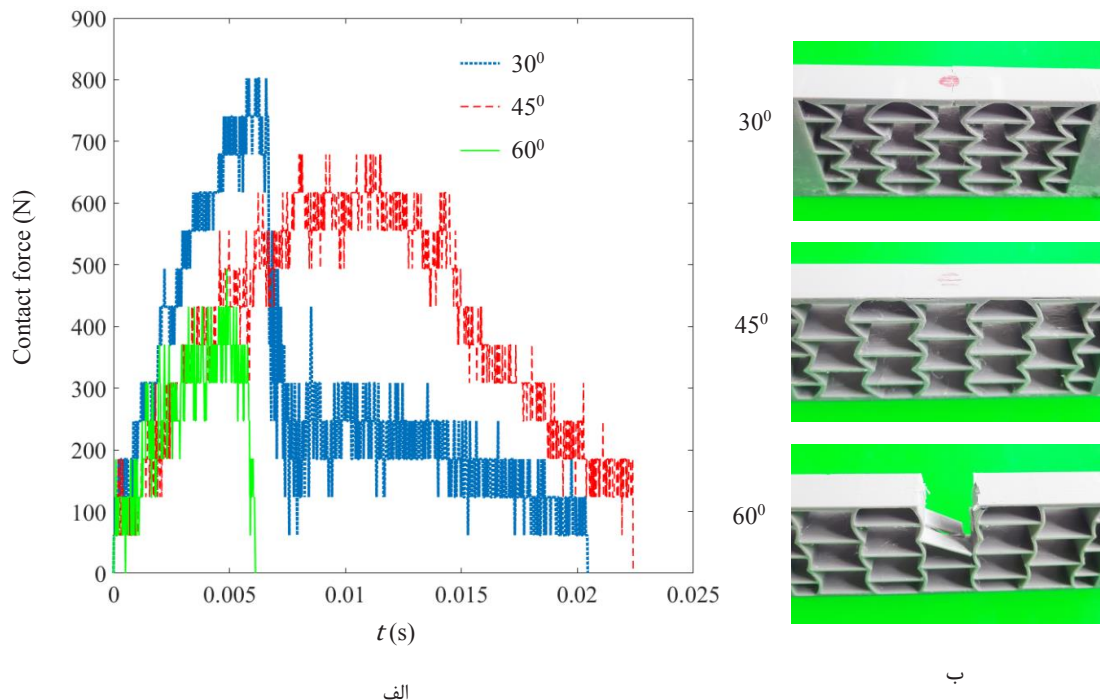
اعمال نیرو به یک سلول واحد باعث افزایش و سپس کاهش نیرو می‌شود و هنگامی که یک سلول واحد دیگر اضافه می‌شود، نیرو دوباره افزایش و کاهش می‌یابد.

شکل ۸ تاریخچه نیروی تماسی بین نوک ضربه‌زننده و سطح بالایی تیر ساندویچی با هسته آگزتیک دوبعدی خمیده ری-اینترنت شامل زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه را پس از آزمایش ضربه سقوط آزاد ۳ ژول نشان می‌دهد. حداکثر نیروی تماسی برای سلول‌های واحد خمیده با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب برابر با ۸۰۲/۴۶۹، ۶۷۹/۰۱۲ و ۴۹۳/۸۲۷ نیوتن است. به عبارت دیگر، با افزایش ۵۰ و ۱۰۰ درصدی زاویه سلول واحد خمیده نسبت به زاویه ۳۰ درجه، حداکثر نیروی تماسی به ترتیب ۱۵/۳۸ و ۳۸/۴۶ درصد کاهش یافته است. مقدار سفتی تماسی در معادله (۴) با تغییر زاویه سلول واحد



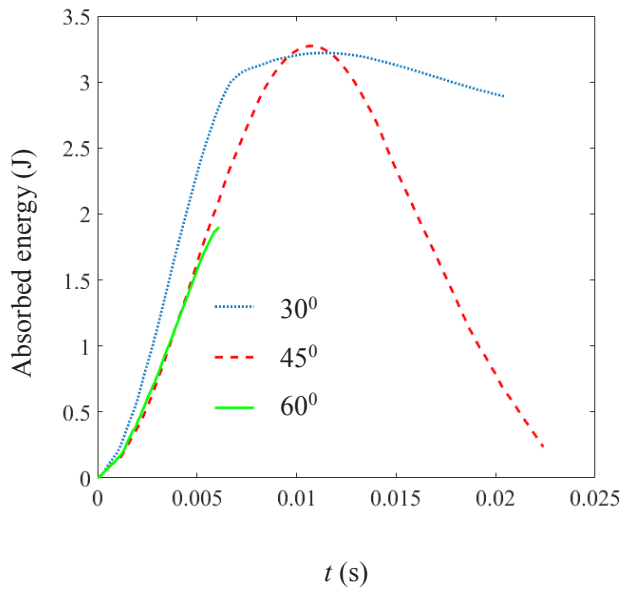
شکل ۷. الف) منحنی نیروی خمشی-جابجایی تیر و ب) نمونه‌های تیر ساندویچی با هسته آگز تیک دوبعدی خمیده ری-اینترنت شامل زوایای 30° ، 45° و 60° درجه پس از آزمایش خمش سه نقطه.

Fig. 7. a) Bending force-displacement curve of the beam and b) sandwich beam specimens with two-dimensional curved re-entrant auxetic core, including angles of 30, 45, and 60 degrees after three-point bending test.

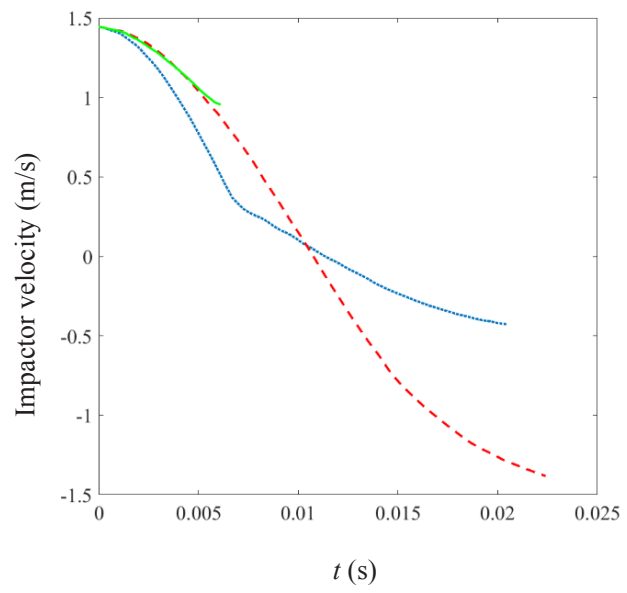


شکل ۸. الف) منحنی تاریخچه نیروی تماسی و ب) نمونه‌های تیر ساندویچی با هسته آگز تیک دوبعدی خمیده ری-اینترنت شامل زوایای 30° ، 45° و 60° درجه پس از آزمایش ضربه سقوط وزنه ۳ ژول.

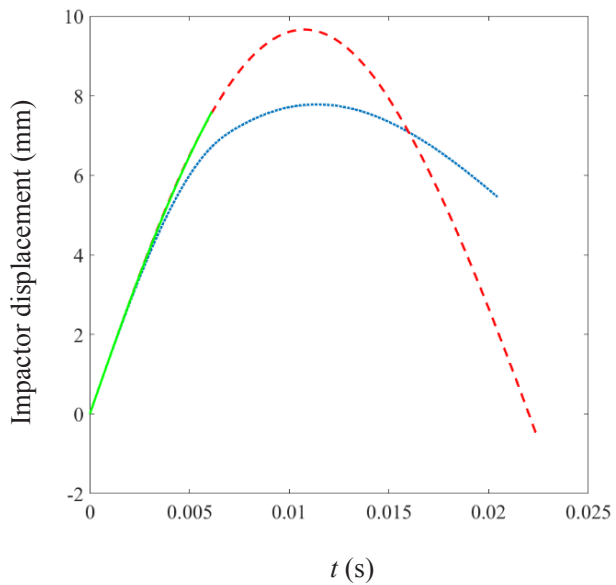
Fig. 8. a) Contact force history curve and b) sandwich beam specimens with two-dimensional curved re-entrant auxetic core, including angles of 30, 45, and 60 degrees after a 3-Joule drop-weight impact test.



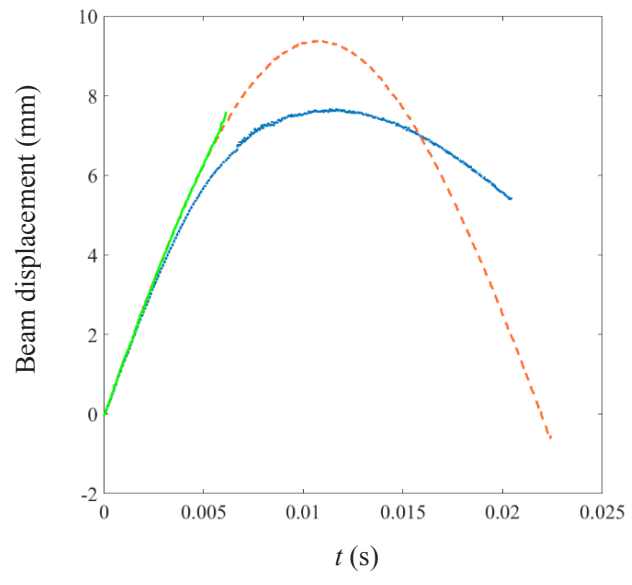
الف



ب



ج



د

شکل ۹. الف) انرژی جذب شده، ب) سرعت ضربه زننده، ج) جابجایی ضربه زننده و د) جابجایی تیر با هسته آگزتیک دوبعدی خمیده ری-اینترنت شامل زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه پس از آزمایش ضربه سقوط وزنه ۳ ژول.

Fig. 9. a) Absorbed energy, b) impactor velocity, c) impactor displacement, and d) beam displacement with two-dimensional curved re-entrant auxetic core, including angles of 30, 45, and 60 degrees after a 3-Joule drop-weight impact test.

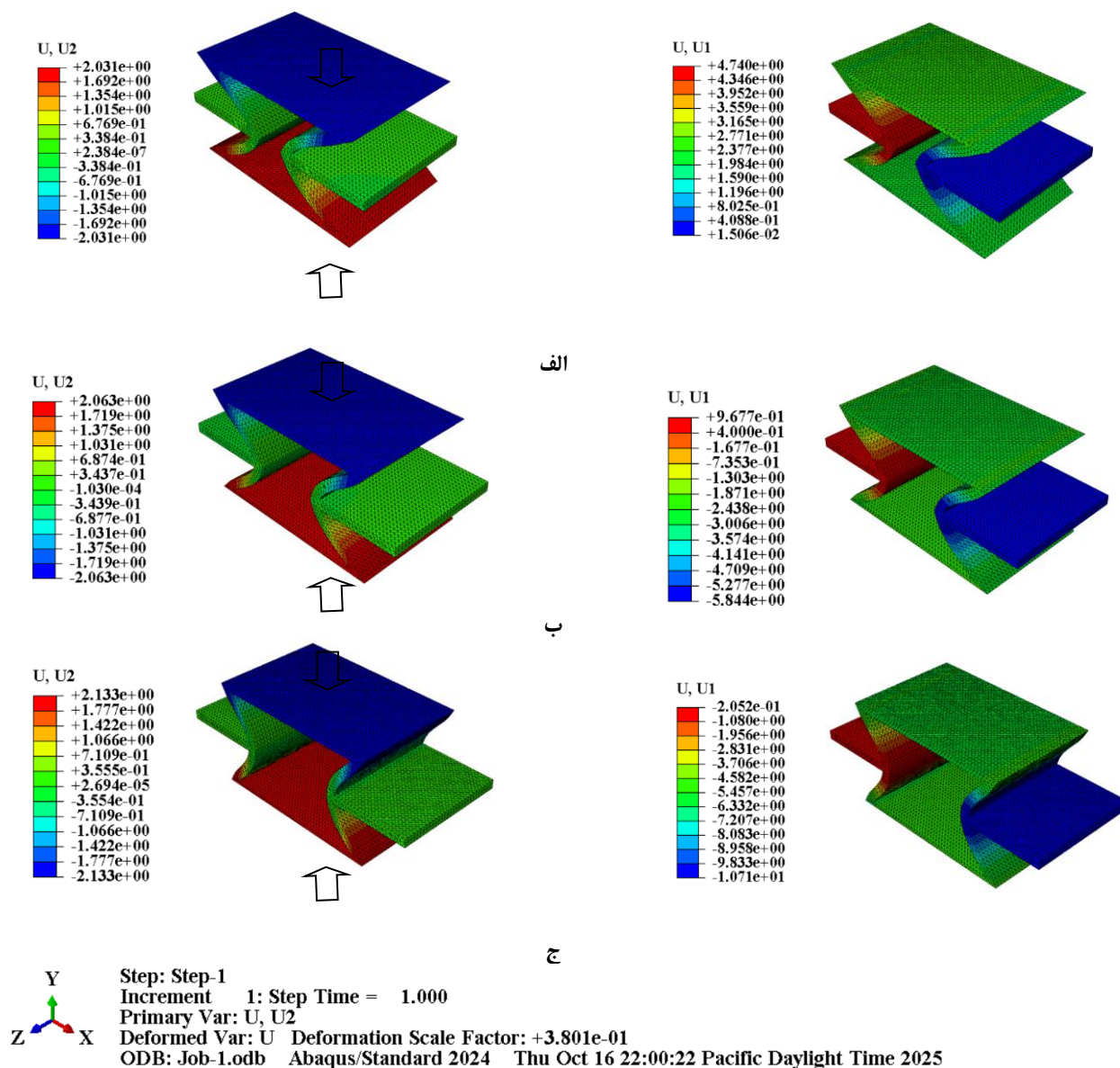
حل مساله در نرم افزار آباکوس استفاده شد.

با محاسبه کرنش محوری (ϵ_2) و کرنش جانبی (ϵ_1) در شکل ۱۰، می‌توان نسبت پواسون سلول واحد ($\nu = -\epsilon_1/\epsilon_2$) را محاسبه کرد. از طرف دیگر چگالی نسبی سلول واحد به صورت نسبت مساحت سطح مقطع سلول واحد به مساحت مستطیل دربرگیرنده سلول واحد تعریف می‌شود که در چگالی پلی‌لاکتیک اسید (۱۲۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب) ضرب می‌گردد. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار سالیدورکس، مساحت‌ها محاسبه شده و چگالی‌های نسبی سلول‌های واحد بدست می‌آیند. در جدول ۲، نسبت پواسون و چگالی نسبی سلول‌های واحد آگزتیک دوبعدی خمیده ری-اینترنت با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه ارائه شده است. جدول ۲ نشان می‌دهد که با افزایش زاویه سلول واحد چگالی نسبی آن کاهش میابد، به طوری که چگالی نسبی با افزایش زاویه سلول واحد از ۳۰ به ۴۵ درجه، ۱۹،۸۲ درصد کاهش یافته و با افزایش زاویه سلول واحد از ۳۰ به ۶۰ درجه، ۳۱/۲۱ درصد کاهش یافته است. برای توجیه نتایج شکل‌های ۷ و ۸، می‌توان اشاره کرد که با افزایش زاویه سلول واحد خمیده، چگالی نسبی سلول واحد کاهش میابد که باعث کاهش نیروی خمشی و نیروی ضربه در شکل‌های ۷ و ۸ می‌شود و به عبارتی چگالی نسبی خیلی پایین سلول واحد با زاویه ۶۰ باعث شده این سلول واحد در اثر ضربه ۳ ژول دچار شکست شود (شکل ۸ ب). با توجه به اینکه نمونه‌های سلول واحد ۳۰ و ۴۵ درجه در اثر ضربه دچار لهیدگی شده‌اند و شکست کامل در سلول‌های واحد آنها رخ نداده است (شکل ۸ ب)، با بررسی جدول ۲ می‌توان مشاهده کرد نسبت پواسون سلول واحد با زاویه ۴۵ درجه ۲۲/۴۶ درصد کمتر از زاویه ۳۰ درجه است. پایین‌تر بودن نسبت پواسون سلول واحد با زاویه ۴۵ درجه نسبت به ۳۰ درجه، نشان می‌دهد که کرنش بیشتری در راستای محور ۲ دارد که صحت نمودارهای ۹ ج و د را نشان می‌دهد، اینکه سلول واحد با زاویه ۴۵ درجه حداکثر جابجایی ضربه‌زننده و تیر بیشتری نسبت به زاویه ۳۰ درجه داشته است. به خاطر اینکه در زوایای ۳۰ و ۴۵ درجه، ضربه‌زننده جهت سرعتش تغییر کرده و بازگشته، می‌توان مشاهده کرد که در زاویه ۴۵ درجه نسبت به ۳۰ درجه، ضربه‌زننده با مقدار سرعت ۲۲۱/۷۵ درصد بیشتر برگشته (شکل ۹ ب)، انرژی کمتری از دست داده و انرژی بیشتری توسط تیر جذب شده است. طبق تحلیل‌های انجام شده با هدف جذب انرژی بیشتر، تیرهای ساندویچی با هسته آگزتیک دوبعدی خمیده ری-اینترنت با سلول دارای کمترین زاویه (زاویه ۳۰ درجه)، مقدار بهینه را در بین زوایا دارند.

شکل بر پاسخ ضربه بررسی شده است. انرژی جذب‌شده برای زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب ۲/۸۹۴۶۸، ۰/۲۳۵۷۷۴ و ۱/۸۹۷۴۲ ژول به دست آمده است. مقادیر سرعت باقیمانده برخورد برای سلول‌های واحد خمیده با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب ۰/۴۲۶۳۳۱، ۱/۳۷۱۷۲ و ۰/۹۵۷۵۵۷+ متر بر ثانیه است. همچنین، حداکثر جابجایی ضربه‌زننده برای سلول‌های واحد خمیده با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب ۷/۷۷۸۷۳، ۹/۶۵۸۷۸ و ۷/۵۹۸۲۹ میلی‌متر و حداکثر جابجایی تیر در نقطه برخورد به ترتیب ۷/۶۷۶۵۳، ۹/۳۷۹۸۸ و ۷/۵۹۸۲۹ میلی‌متر است. با توجه به اینکه سلول واحد با زاویه ۶۰ درجه دچار شکست کامل شده، در این مورد کنار گذاشته می‌شود و مورد بهینه نمی‌باشد. با تغییر زاویه سلول واحد از ۳۰ به ۴۵ درجه، مقدار سرعت باقیمانده برخورد ۲۲۱،۷۵ درصد، حداکثر جابجایی ضربه‌زننده ۲۴،۱۷ درصد و حداکثر جابجایی تیر در نقطه برخورد ۲۲،۱۹ درصد افزایش یافته است. با تغییر زاویه سلول واحد خمیده از ۳۰ به ۴۵ درجه، میزان انرژی جذب شده ۹۱/۸۵ درصد کاهش می‌یابد.

با مقایسه شکل‌های ۷ و ۸ می‌توان نتیجه گرفت یک نوع هم‌بستگی بین مقدار نیروی حداکثر خمش و ضربه با تغییرات زاویه سلول واحد خمیده برقرار بوده و هر دو مقدار نیروی حداکثر با افزایش زاویه سلول واحد خمیده، کاهش می‌یابند. از لحاظ انرژی جذب‌شده نیز با توجه به اینکه مورد سلول واحد ۶۰ درجه در اثر ضربه دچار تخریب شده، کنار گذاشته می‌شود. هم‌بستگی بین انرژی جذب‌شده توسط تیر نیز بین نمودارهای خمش در زوایای ۳۰ و ۴۵ درجه سلول واحد نیز دیده می‌شود که سلول واحد خمیده با زاویه ۳۰ درجه نسبت به ۴۵ درجه در خمش (مساحت زیر نمودار شکل ۷ الف) دارای انرژی بیشتر و همچنین انرژی نهایی جذب شده در تست ضربه (شکل ۹ الف) نیز در مورد سلول واحد خمیده ۳۰ درجه از ۴۵ درجه بیشتر است.

با توجه به اینکه مواد آگزتیک با نسبت پواسون منفی تعریف می‌شوند، به همین منظور ابتدا سلول‌های واحد آگزتیک دوبعدی خمیده ری-اینترنت با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه در نرم‌افزار سالیدورکس طراحی و سپس در نرم‌افزار آباکوس بر حسب خواص مکانیکی ارائه شده در جدول ۱ تحت جابجایی فشاری در راستای محور Y (محور ۲) قرار گرفته و نتایج تغییر شکل در راستاهای x (محور ۱) و Y در شکل ۱۰ ارائه شده‌اند. در این تحلیل، بر روی سطوح بالایی و پایینی سلول واحد جابجایی فشاری هر کدام به اندازه ۲ میلی‌متر (در مجموع ۴ میلی‌متر) ایجاد و همچنین جابجایی‌ها در دو طرف سلول واحد در راستای محور Z (محور ۳) محدود شد. از گام استاتیکی برای



شکل ۱۰. تغییر شکل (بر حسب میلی‌متر) سلول‌های واحد آگزتیک دوبعدی خمیده ری-اینترنت بعد از بارگذاری در نرم‌افزار آباکوس (الف) زاویه ۳۰ درجه، (ب) زاویه ۴۵ درجه و (ج) زاویه ۶۰ درجه.

Fig. 10. Deformation (in millimeters) of the two-dimensional curved re-entrant auxetic unit cells after loading in ABAQUS software, a) 30-degree angle, b) 45-degree angle and c) 60-degree angle.

جدول ۲. چگالی نسبی و نسبت پواسون سلول‌های واحد آگزتیک دوبعدی خمیده ری-اینترنت با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه.

Table 2. Relative density and Poisson's ratio of the two-dimensional curved re-entrant auxetic unit cells with angles of 30, 45 and 60 degrees.

نسبت پواسون	چگالی نسبی	زاویه (درجه)
-۲/۶۷۵۸	۲۵۲/۷۱۲۰	۳۰
-۲/۰۷۴۹	۲۰۲/۶۱۶۰	۴۵
-۲/۳۲۰۰	۱۷۳/۸۴۸۰	۶۰

۴- نتیجه گیری

این مطالعه به بررسی اثرات ضربه سرعت پایین بر روی یک تیرهای ساندویچی با هسته آگزتیک دوبعدی خمیده ری-اینترنت پرداخت. نمونه‌های آزمایش کشش با استفاده از چاپگر سه‌بعدی تولید و خواص مکانیکی آنها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. علاوه بر این، نمونه‌های تیر ساندویچی با هسته آگزتیک دوبعدی خمیده ری-اینترنت با استفاده از چاپگر سه‌بعدی ساخته شدند که شامل سلول‌های واحد خمیده با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه بودند. با استفاده از نرم افزارهای سالیدورکس و آباکوس چگالی نسبی و ضریب پواسون سلول‌های واحد استخراج گردید. از مهمترین نتایج آزمایش خمش سه‌نقطه و ضربه سقوط وزنه ۳ ژول می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

- هرگونه افزایش در زاویه سلول واحد خمیده باعث کاهش چگالی نسبی سلول واحد و در نتیجه منجر به کاهش شیب منحنی نیرو-جابجایی و محدوده نیروی خمشی در آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای شد.

- نتایج آزمایش ضربه سقوط وزنه ۳ ژول نشان داد که تیر ساندویچی با هسته آگزتیک دوبعدی خمیده ری-اینترنت با زوایای ۳۰ درجه شامل لهیدگی و ترک‌های سطحی در محل تماس بوده و حداکثر نیروی تماسی آن بیشتر از زاویه ۴۵ درجه‌ای بود که فقط در نقطه تماس دچار لهیدگی شد. حداکثر نیروی تماسی در زاویه ۶۰ درجه در مقایسه با سایر زوایا به دلیل شکست سلول واحد واقع در نقطه برخورد، به شدت کاهش یافت. به عبارتی کاهش حداکثر نیروی تماسی با افزایش زاویه سلول واحد نیز ناشی از کاهش چگالی نسبی سلول واحد بود.

- با توجه به اینکه سلول واحد با زاویه ۶۰ درجه در اثر برخورد دچار شکست شد به همین دلیل از بین نمونه‌ها کنار گذاشته شد و در نتیجه در زاویه ۴۵ درجه نسبت به ۳۰ درجه، ضربه زننده با مقدار سرعت بیشتری برگشت، یعنی انرژی کمتری توسط تیر جذب شد، به عبارتی در زاویه ۳۰ درجه انرژی بیشتری توسط تیر جذب شد.

منابع

- [1] V.G. Veselago, The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ , Phys.-Usp., 10(4) (1968) 509-514.
- [2] K. Parveen, Metamaterials: Types, applications, development, and future scope, Int.. J. Adv. Res. Innov. Ideas Educ. Tech., 4(3) (2018) 2325-2327.
- [3] M.I. Hussein, M.J. Leamy, M. Ruzzene, Dynamics of phononic materials and structures: Historical origins, recent progress, and future outlook, Appl. Mech. Rev., 66(4) (2014) 040802.
- [4] R. Kumar, M. Kumar, J.S. Chohan, S. Kumar, Overview on metamaterial: History, types and applications, Mater. Today: Proc., 56 (2022) 3016-3024.
- [5] J.U. Surjadi, L. Gao, H. Du, X. Li, X. Xiong, N.X. Fang, Y. Lu, Mechanical metamaterials and their engineering applications, Adv. Eng. Mater., 21(3) (2019) 1800864.
- [6] Y. Fung, Foundations of solid mechanics Prentice-Hall, Inc, New Jersey, (1965).
- [7] T. Ting, T. Chen, Poisson's ratio for anisotropic elastic materials can have no bounds, Q. J. Mech. Appl. Math., 58(1) (2005) 73-82.
- [8] K.K. Saxena, R. Das, E.P. Calius, Three decades of auxetics research- materials with negative Poisson's ratio: a review, Adv. Eng. Mater., 18(11) (2016) 1847-1870.
- [9] M. Kazemi, A.M. Eghbalpoor, Types and application of auxetic cells: A review, Mech. Adv. Mater. Struc., (2024) 1-23. doi:10.1080/15376494.2024.2433092
- [10] R. Lakes, Foam structures with a negative Poisson's ratio, Sci., 235(4792) (1987) 1038-1040.
- [11] K.E. Evans, Auxetic polymers: a new range of materials, Endeavour, 15(4) (1991) 170-174.
- [12] T. Allen, J. Shepherd, T. Hewage, T. Senior, L. Foster, A. Alderson, Low-kinetic energy impact response of auxetic and conventional open-cell polyurethane foams, Phys. Status Solidi B, 252(7) (2015) 1631-1639.
- [13] O. Duncan, L. Foster, T. Senior, A. Alderson, T. Allen, Quasi-static characterisation and impact testing of auxetic foam for sports safety applications, Smart Mater. Struct., 25(5) (2016) 054014.
- [14] L. Jiang, H. Hu, Finite element modeling of multilayer orthogonal auxetic composites under low-velocity impact, Mater., 10(8) (2017) 908.
- [15] S. Yang, V.B. Chalivendra, Y.K. Kim, Fracture and impact characterization of novel auxetic Kevlar®/Epoxy laminated composites, Compos. Struct., 168 (2017) 120-129.

- Thin-Walled Struct., 185 (2023) 110577.
- [23] H. Peyghani, M. Ranjbar-Roeintan, Low-velocity impact on a CFRP sandwich plate with a reentrant auxetic core, *Mech. Adv. Mater. Struct.*, (2024) 1-16. doi:10.1080/15376494.2024.2420258
- [24] Y.C. Qu, X.C. Teng, Y. Zhang, W.Z. Jiang, M.L. Xue, T. Xue, J.W. Shi, X. Ren, A novel 3D composite auxetic sandwich panel for energy absorption improvement, *Eng. Struct.*, 322 (2025) 119129.
- [25] M. Kazemi, A. Mirzabigi, Influence of Core Density and Thickness on the Behavior of Sandwich Beams under Three-Point Bending: Analytical and Experimental, *Teh. Vjesn.*, 30(6) (2023) 1992-2000.
- [26] B. Taherkhani, A. Pourkamali Anaraki, J. Kadkhodapour, Fabrication and testing of re-entrant auxetic samples and sensor: numerically and experimentally, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(6 (Special Issue)) (2021) 3987-4008. (in Persian)
- [27] R. Jafari Nedoushan, M.J. Abghary, Design and analysis of mechanical behavior of a novel lattice auxetic structure based on rigid rotating mechanism, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 55(2) (2023) 179-192. (in Persian)
- [28] M. Ranjbar, S. Feli, Mechanical and low-velocity impact properties of epoxy-composite beams reinforced by MWCNTs, *J. Compos. Mater.*, 53(5) (2019) 693-705.
- [16] S. Hou, T. Li, Z. Jia, L. Wang, Mechanical properties of sandwich composites with 3d-printed auxetic and non-auxetic lattice cores under low velocity impact, *Mater. Des.*, 160 (2018) 1305-1321.
- [17] W. Lee, Y. Jeong, J. Yoo, H. Huh, S.-J. Park, S.H. Park, J. Yoon, Effect of auxetic structures on crash behavior of cylindrical tube, *Compos. Struct.*, 208 (2019) 836-846.
- [18] Q. Gao, W.-H. Liao, L. Wang, On the low-velocity impact responses of auxetic double arrowed honeycomb, *Aerosp. Sci. Technol.*, 98 (2020) 105698.
- [19] C. Li, H.-S. Shen, J. Yang, H. Wang, Low-velocity impact response of sandwich plates with GRC face sheets and FG auxetic 3D lattice cores, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 132 (2021) 335-344.
- [20] L. Wang, J. Sun, T. Ding, Y. Liang, J. Ho, M. Lai, Manufacture and behaviour of innovative 3D printed auxetic composite panels subjected to low-velocity impact load, *Struct.*, 38 (2022) 910-933.
- [21] M. Kazemi, Experimental analysis of sandwich composite beams under three-point bending with an emphasis on the layering effects of foam core, *Struct.*, 29 (2021) 383-391.
- [22] W.-J. Wang, W.-M. Zhang, M.-F. Guo, J.-S. Yang, L. Ma, Energy absorption characteristics of a lightweight auxetic honeycomb under low-velocity impact loading,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Z. Tahmasebi-Tahneh, M. Ranjbar-Roeintan, Low-velocity Impact on Sandwich Beams with Two-Dimensional Curved Re-Entrant Auxetic Cores, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 57(6) (2025) 757-772.

DOI: [10.22060/mej.2025.24695.7895](https://doi.org/10.22060/mej.2025.24695.7895)

